

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Солдатова Марія Олександрівна**

УДК 681.52

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО РУХУ  
БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ (БПЛА)**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України.

**Науковий керівник** – кандидат технічних наук, доцент **Ткач Михайло Мартинович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, доцент кафедри технічної кібернетики.

**Офіційні опоненти** – доктор технічних наук, професор **Казак Василь Миколайович**, Національний авіаційний університет МОН України, професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту.

– доктор технічних наук, професор **Руденко Олег Григорович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій і систем.

Захист дисертації відбудеться *11 грудня 2019 р. о 14 годині 30 хвилин* на засіданні спеціалізованої ради Д 26.002.04 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корп. 19, ауд. № 530.

З дисертацією та авторефератом можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці імені Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий «\_\_\_» листопада 2019 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04  
кандидат технічних наук, доцент

Ковалюк Д.О

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

### **Актуальність теми**

Технічний рівень використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), досягнутий за останні роки, дозволяє використовувати їх для будь-якої діяльності. Одним з найбільш важливих завдань є якісне виконання всієї програми польоту незалежно від впливу випадкових факторів. Тому, задача аналізу та синтезу оптимальних систем стабілізації руху БПЛА є безумовно актуальною.

Теоретична і практична значущість завдань аналізу і синтезу оптимальних систем стабілізації програмного руху БПЛА при відносній складності його математичного та обчислювального апарату, з очевидністю визначають необхідність широкого використання сучасних засобів обчислювальної техніки та комп'ютерних технологій для реалізації відповідних засобів і алгоритмів, спрямованих на розвиток математичних методів оптимізації перехідних процесів стабілізації програмного руху БПЛА в різних умовах польоту.

Питанням дослідження ідентифікації та оптимізації динамічних систем присвячені роботи відомих вітчизняних і зарубіжних вчених, таких як: Д. Гроп, К. Спіді, Р. Браун, Я.З. Ципкін, П. Эйкхофф, Э. Сейдж, Дж.Мелса, О.Н. Новоселов, L. Lennart, Р.Калман, А.М.Летов, А.А.Красовський, Р.Габасов, М.З.Згуровський, Ф.М. Кіріллова, В.М. Кунцевіч, К.А. Лурье, Р. Беллман, В.Г. Болтянский, М. Атанс, П. Фалб, Х. Квакуернаак, Р. Сиван, Л.С. Понтрягин, К.Т. Леондес, А.А. Воронов, В.С. Пугачов, І.Є. Казаков, В.М. Казак, В.Н.Буков, А.Г. Александров. та ін.

Ця область залишається сферою інтенсивної розробки і в даний час.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Робота виконувалася відповідно до планів наукових досліджень кафедри технічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського, у виконанні яких здобувач брав безпосередню участь, а саме:

«Розробка системи контролю та управління роботизованими мобільними засобами для комплексного моніторингу стану середовища та наземних об'єктів»(№ державної реєстрації НДР: 0113U003351).

### **Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є мінімізація витрат енергоресурсів в процесі польоту БПЛА за рахунок автоматичної оптимальної стабілізації його програмного руху.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Розробити метод перетворення одного класу лінійних нестационарних моделей руху БПЛА в еквівалентні їм лінійні стаціонарні моделі.
2. Розробити узагальнену процедуру параметричної ідентифікації параметрів лінійних динамічних моделей руху БПЛА на базі сплайн-функцій і функцій Уолша.

3. Розробити алгоритм адаптивного вибору кроку процедури ідентифікації параметрів руху БПЛА.
4. Розробити процедуру синтезу оптимальних замкнених законів стабілізації програмного руху нестаціонарних БПЛА на базі сплайн-функцій і функцій Уолша для лінійно-квадратичних задач оптимізації.
5. Синтезувати модальні оптимальні закони стабілізації програмного руху стаціонарних БПЛА при відсутності і наявності запізнювання в контурі управління.
6. Синтезувати модальний робастний закон стабілізації програмного руху стаціонарних БПЛА з параметричною невизначеністю.
7. Розробити методи агрегації змінних стану БПЛА і спрощення структури його оптимальних регуляторів.

*Об'єктом дослідження є процес стабілізації програмного руху БПЛА.*

*Предметом дослідження є методи та алгоритми розв'язання задач оптимізації енергетичних ресурсів в режимах стабілізації програмного руху БПЛА в різних умовах польоту.*

*Методами дослідження є теорія автоматичного управління, принцип максимуму (мінімуму) Понтрягіна, метод фазового простору, аналітичне конструювання оптимальних регуляторів (АКОР), теорія секвентних послідовностей, теорія матриць, теорія диференціальних рівнянь.*

### **Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна отриманих в дисертаційній роботі результатів полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано метод перетворення одного класу лінійних нестаціонарних моделей руху БПЛА в еквівалентні їм лінійні стаціонарні моделі, для яких можна застосувати відомі й апробовані методи оптимізації.
2. Вперше запропонована процедура оптимізації процесів стабілізації програмного руху БПЛА на основі принципу мінімуму в поєднанні зі сплайн-функціями і функціями Уолша, що дозволяє синтезувати оптимальні закони стабілізації в аналітичній формі.
3. Вперше запропоновано метод невизначених коефіцієнтів для реалізації процедури модального синтезу для лінійних динамічних моделей руху БПЛА, який на відміну від існуючих дає можливість визначити оптимальний закон стабілізації з заданими показниками якості перехідних процесів, у тому числі і при наявності запізнення в контурі управління.
4. Вперше запропонована процедура оптимізації процесів стабілізації руху стаціонарних БПЛА з параметричною невизначеністю на основі модального

синтезу і принципу гарантованої динаміки, що дає можливість синтезу робастного стабілізатора програмного руху БПЛА.

**Практичне значення отриманих результатів:** отримані в дисертації теоретичні результати дозволяють значно розширити клас технічних систем і технологічних процесів, які потребують оптимізації перехідних процесів в режимах стабілізації динаміки їх стану.

Робота становить інтерес як для державних, так і для приватних організацій, що займаються проектуванням і оптимізацією систем управління БПЛА, зокрема розробкою автопілотів різного типу літаків, а також складних технічних систем і технологічних процесів. Розроблені оптимальні алгоритми стабілізації програмного руху БПЛА впроваджені в Науково-виробничому об'єднанні «АВІА» (м. Кременчук). Крім того, частина методів увійшла в програму навчання студентів на кафедрі технічної кібернетики факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Результати підтверджені актами впровадження, які наведені в додатку.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення та результати дисертаційної роботи, що захищаються, одержані автором самостійно. У роботах, що опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: метод еквівалентного перетворення лінійних динамічних моделей, узагальнена методика параметричної ідентифікації, адаптивний алгоритм розбиття інтервалу спостереження, процедура синтезу оптимальних за витратами енергії і витратами палива оптимальних регуляторів стабілізації нестационарних моделей руху БПЛА, модальний синтез оптимальних регуляторів стабілізації стаціонарних моделей руху БПЛА на основі методу невизначених коефіцієнтів, модальний синтез робастного регулятора на основі принципу гарантованої динаміки, метод агрегування змінних стану,

**Апробація роботи.** Основні підсумки досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях:

- Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» м Дніпропетровськ, 24-26 березня 2015р.
- Всеукраїнська науково-методична конференція «Особливості викладання фахових дисциплін технічних спеціальностей – виклики часу та перспективи» 21 березня 2017 р., м. Харків.
- Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» м. Дніпро, 28-30 березня 2017р.
- Міжнародна науково-технічна конференція “Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС '2017”, 26-29 червня 2017р., м. Чернігів.

- Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні управляючі системи та технології» (ІУСТ – Одеса – 2017), 20-22 вересня 2017 р.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 11 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях іноземних держав, 8 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 4 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура роботи.** Дисертація складається із двох анотацій (українською та англійською мовами), вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації 169 сторінок, у тому числі 15 рисунків, список використаних джерел з 124 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання наукового дослідження, викладена наукова новизна, практична цінність і реалізація результатів роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз проблеми автоматизації процесу стабілізації програмного руху БПЛА. Показано, що у загальному випадку рішення даної проблеми є досить складним в силу нелінійності, нестаціонарності. Для задач стабілізації програмного руху БПЛА можна розглядати спрощені лінеаризовані моделі динаміки руху БПЛА по кожному з трьох каналів управління: подовжньому, боковому руху і руху навколо центру мас. Проблема автоматичної оптимальної стабілізації програмного руху БПЛА може бути вирішена на основі запропонованого в роботі підходу, який реалізується структурно-функціональною схемою (рис.1), за наявності достатнього навігаційного і комп'ютерного обладнання.

Згідно цієї схеми процес реалізації автоматичної оптимальної стабілізації програмного руху БПЛА здійснюється наступним чином. До початку польоту на вхід бортової системи управління (БСУ) вводиться задана програмна траєкторія руху. Отримана програмна траєкторія через повну модель динаміки БПЛА (ПМД) надходить у блок розрахунку програмного управління і через блок датчиків-перетворювачів (БДП1) подається в польоті на органи управління БПЛА, при цьому

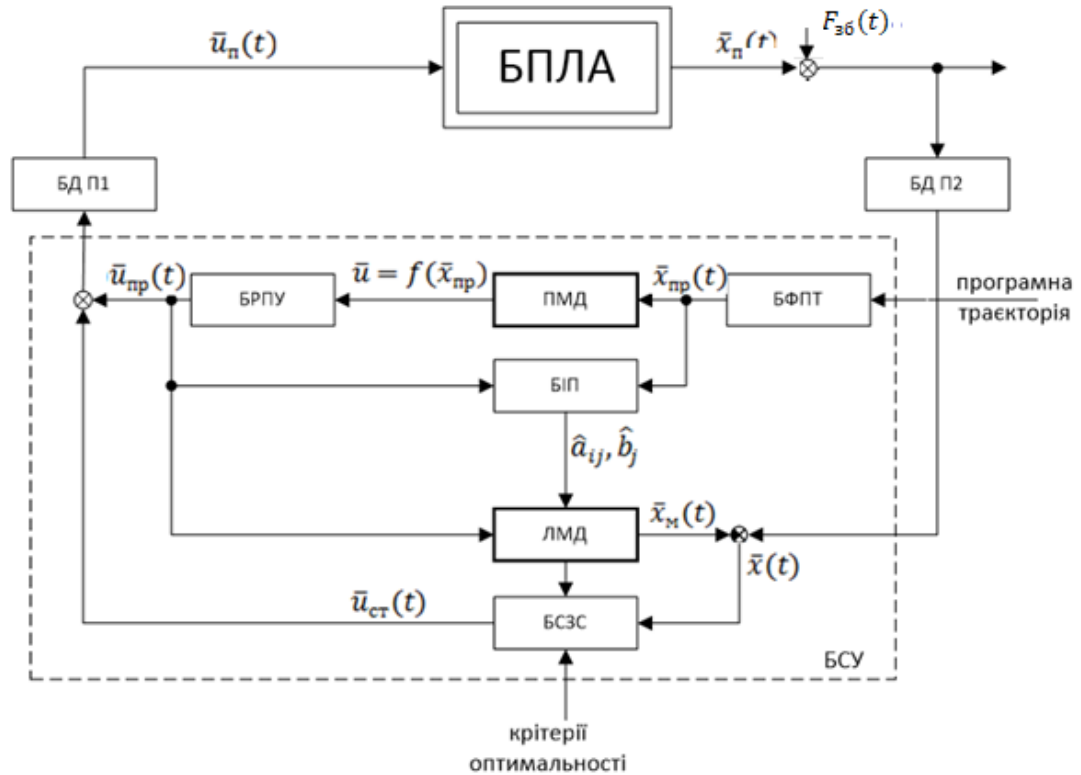


Рис.1. Структурно-функціональна схема процесу реалізації автоматичної оптимальної стабілізації програмного руху БПЛА

в польоті для заданих ділянок програмного руху БПЛА на основі інформації по програмному управлінню та програмній траєкторії в блоці ідентифікації параметрів руху БПЛА (БІП) обирається відповідна цій ділянці лінеаризована динамічна модель руху БПЛА і здійснюється оцінка її параметрів у вигляді рядів Уолша. Ці дані надходять в обрану лінеаризовану модель динаміки руху БПЛА (ЛМД), на виході якої при подачі програмного управління формується модельна програмна траєкторія і порівнюється з поточною траєкторією, що надходить через блок датчиків-перетворювачів (БДП2). Раптова поява неузгодженості між програмною і поточною траєкторіями («повітряна яма», потужний порив вітру, вхід в зону сильної турбулентності, скидання вантажу (бомбометання) та ін.) надходить у блок синтезу законів стабілізації (БСЗС). З урахуванням заданих ззовні критеріїв оптимальності БСЗС автоматично формує в реальному масштабі часу управління, яке ліквідує виниклу неузгодженість відповідно із заданим критерієм якості.

Отже, наведені раніше основні задачі дисертаційного дослідження вирішуються в рамках даної схеми, яка, по суті, реалізує двоконтурну автоматичну систему управління рухом БПЛА, тобто, контур програмного руху і контур оптимальної стабілізації програмного руху.

Враховуючи сказане вище, в загальному випадку динаміка руху БПЛА в режимах стабілізації може бути описана лінійними нестационарними системами виду:

$$\dot{\bar{x}}(t) = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t) + F_{36}(t), \quad t \in [t_0, t_f], \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}^0, \quad (1)$$

де  $A(t) = \{a_{ij}(t)\}$ ,  $B(t) = \{b_{ik}(t)\}$  - матриці коефіцієнтів розміру  $n \times n$  і  $n \times m$  відповідно, елементи яких є знакопостійними, монотонними функціями і мають неперервні перші похідні в обмеженій області визначення на інтервалі часу  $[t_0, t_f]$ , що відповідає рівнянням (2) і (3);  $F_{36}(t)$  - збурення.

$$\text{sign}[a_{ij}(t)] = \text{const}, \text{sign}[b_{ik}(t)] = \text{const} \quad (2)$$

$$\text{sign}[da_{ij}(t)/dt] = \text{const}, \text{sign}[db_{ik}(t)/dt] = \text{const} \quad (3)$$

Тоді лінійні стаціонарні і квазістаціонарні системи є окремими випадками системи (1).

У **другому розділі** запропонована узагальнена процедура оцінки параметрів лінійних динамічних моделей руху БПЛА, яка використовує сплайн-функції та ортогональне розкладання в ряд за системою функцій Уолша, що дозволяє знаходити при мінімізації інтегрального квадратичного критерію нев'язки оцінки шуканих параметрів на основі рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь для широкого класу лінійних динамічних систем.

Практична реалізація узагальненої процедури здійснюється на основі наступного алгоритму:

Крок 1. Визначаємо окремі ділянки польоту БПЛА і їх тривалість. Вводимо безрозмірний час  $\tau$  рівний  $\tau = \frac{t - t_0}{T_f - t_0}$  і наводимо тривалість управління на цих ділянках  $[t_0, t_f]$  до нормованого інтервалу  $[0, 1]$ .

Крок 2. На нормованому інтервалі  $[0, 1]$  задаємо сітку  $\langle \tau_i \rangle (i = \overline{0, N}; t_N = 1)$  з кроком  $\Delta_N$ . Визначаємо значення вектору стану  $\bar{x}(\tau_i)$  і управління  $\bar{u}(\tau_i)$  із заданої програмної траєкторії і отриманого із повної моделі програмного управління.

Крок 3. На обраній сітці здійснюємо інтерполяцію, отримуючи аналітичний вираз для оцінки вектор-функції стану і управління відповідно у вигляді кубічних сплайнів  $\bar{S}_x(\tau)$  і  $\bar{S}_u(\tau)$ .

Крок 4. Для знайдених функцій  $\bar{S}_x(\tau)$  і  $\bar{S}_u(\tau)$  застосовуємо ортогональне розкладання в ряд Уолша.



Крок 5. Нормуємо за часом обрану лінійну модель руху БПЛА і наводимо її до інтегрального виду,

Крок 6. Використовуючи властивості функцій Уолша, замінюємо операцію інтегрування на квадратну операційну матрицю інтегрування  $P_{(NXN)}$ . Суть даної властивості в тому, що інтеграл функції Уолша залишається в класі системи функцій Уолша, тобто

$$\int_0^x \bar{\varphi}_N(x) dx \approx P_{(NXN)} \bar{\varphi}_N(x), \quad (4)$$

де  $\bar{\varphi}_N(x) = \{\varphi_0(x) \dots \varphi_N(x)\}$  – вектор, компонентами якого є функції Уолша.

Крок 7. Скорочуючи ліву і праву частину отриманого рівняння на вектор обраної системи функцій Уолша, отримуємо систему алгебраїчних рівнянь.

Крок 8. Отриману алгебраїчну систему рівнянь вирішуємо щодо невідомих параметрів, представлених сукупністю коефіцієнтів розкладання інтервалу  $[t_0, T_f]$ , перераховуючи відповідним чином знайдені параметри лінійної динамічної моделі руху БПЛА.

В роботі отримані алгоритми оцінки параметрів стаціонарних, квазістаціонарних, нестаціонарних моделей руху БПЛА. Для підвищення точності оцінки пропонується алгоритм з адаптивним вибором розбиття інтервалу стабілізації.

Критерієм розбиття в алгоритмі з адаптивним вибором розбиття інтервалу стабілізації є зважений квадрат нев'язки між координатами програмної траєкторії та координатами моделі

$$I = 1/P \sum_{p=1}^P (x_i(t_p) - x_i^M(t_p))^2. \quad (5)$$

Як приклад в роботі розглянуті результати оцінки параметра  $a_{12}(t)$  системи

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= a_{12}(t)x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= b_2(t)u(t), t \in [0, 100], \end{aligned} \quad (6)$$

де  $x_1(0) = 30, x_2(0) = 50, b_2(t) = 1, u(t) = -1$ . Точне значення оцінюваного параметра  $a_{12}(t) = 0,000012t^3 - 0,0014t^2 + 0,033t + 2$ . Результати оцінки для фіксованого та адаптивного розбиття інтервалу наведені на рис.2, де крива 1 точне значення; крива 2 – оцінка при фіксованому розбитті; крива 4 – оцінка при адаптивному розбитті. Порівняння оцінок для розглянутого прикладу дозволяє зробити висновок, що

точність оцінки параметра може бути істотно підвищена при використанні алгоритму з адаптивним вибором розбиття інтервалу стабілізації.

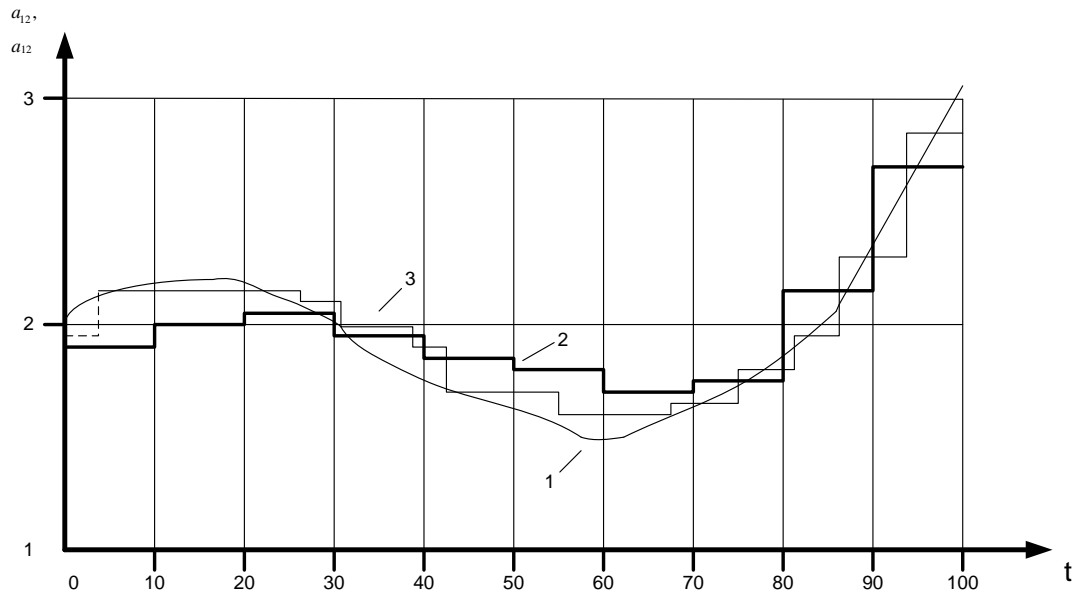


Рис.2. Результати оцінювання параметра  $a_{12}(t)$

У третьому розділі доведено, що для лінійних нестационарних моделей руху БПЛА виду (1), параметри яких задовольняють обмеженням (2), (3), замість шуканої системи (1) можна розглядати еквівалентну їй стаціонарну динамічну модель виду

$$\dot{\bar{y}}(t) = D\bar{y}(t) + C\bar{u}(t), \quad (7)$$

якщо існує невироджене диференційне лінійне перетворення

$$\bar{x}(t) = D(t)\bar{y}(t). \quad (8)$$

Обчислення матриці перетворення  $D(t)$  в загальному випадку досить важке, так як її обчислення призводить до вирішення диференціального рівняння при невідомих граничних умовах. В роботі визначені випадки, коли вдається уникнути такої невизначеності і отримати досить просте рішення. В результаті, при матриці  $D(t)$ , яка відома, завдання оптимального управління нестационарною системою (1) призводить до задачі оптимального управління еквівалентною стаціонарною системою (7), методи вирішення якої достатньо відомі і добре опрацьовані. Якщо таке перетворення неможливо, в роботі розроблені процедури синтезу оптимальних замкнутих законів стабілізації програмного руху БПЛА на базі сплайн-функцій і функцій Уолша для енергозберігаючих задач оптимізації. Зокрема, для нормальних задач оптимізації енергоресурсів лінійних нестационарних моделей руху БПЛА з релейним управлінням, структура яких представляє послідовне з'єднання типових динамічних ланок з монотонними і знакопостійними параметрами виду (9), де

визначена верхня межа кількості перемикачів, що дає можливість синтезувати закон оптимального управління, тобто відшукати оптимальні моменти перемикачів управління.

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_{22}(t) & a_{23}(t) & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_{ii}(t) & a_{i,i+1}(t) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{nn}(t) \end{bmatrix}, B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ b_n(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

При цьому задача пошуку оптимальних моментів перемикачів зведена до розв'язування алгебраїчних рівнянь з точністю, яка визначається кількістю членів розкладання в ряду Уолша, що продемонстровано на прикладі динамічної системи 2-го порядку.

Для лінійно-квадратичних задач оптимізації в роботі розглядається наступна постановка задачі. Знайти управління  $\bar{u}(t) \in E^m$ , яке переводить лінійну нестационарну модель руху БПЛА (1) із заданого початкового стану  $\bar{x}(t_0)$  в нульове кінцеве  $\bar{x}(T_f) = \bar{0}$  за фіксований інтервал часу  $[t_0, T_f]$  і мінімізує функціонал:

$$I = \frac{1}{2} \{ \bar{x}^T(T_f) F \bar{x}(T_f) + \int_{t_0}^{T_f} [\bar{x}^T(t) Q(t) \bar{x}(t) + \bar{u}^T(t) R(t) \bar{u}(t)] dt \}. \quad (10)$$

Приймається, що  $F=0$  і математичні припущення щодо матриць  $Q(t)$ ,  $R(t)$  відповідають фізичним вимогам, що пред'являються до системи стабілізації.

Оптимальний закон управління для цієї задачі може бути отриманий за допомогою принципу максимуму. В силу позитивної визначеності матриці  $R(t)$  управління

$$\bar{u}^*(t) = -R^{-1}(t) B^T(t) \bar{p}^*(t) \quad (11)$$

забезпечує єдиний мінімум функції Гамільтона для (1) і функціоналу (11). Основні труднощі при вирішенні цієї задачі полягають у виявленні зв'язку допоміжної змінної  $\bar{p}^*(t)$  і стану  $\bar{x}^*(t)$ , який в разі лінійних нестационарних систем призводить до вирішення нелінійного нестационарного матричного диференціального рівняння Ріккати в зворотному часу. Зв'язок між  $\bar{p}^*(t)$  і  $\bar{x}^*(t)$  може бути визначений за допомогою фундаментальної матриці рішення системи канонічних рівнянь. Однак, для системи (1) аналітичний вираз для фундаментальної матриці в загальному випадку отримати неможливо. В роботі на основі принципу мінімуму визначена структура оптимальних законів керування у вигляді:

$$\bar{u}^*(t) = -G(t)\bar{x}^*(t_0), \quad (12)$$

де матриця коефіцієнтів  $G(t)$  розміру  $m \times n$

$$G(t) = R^{-1}(t)B^T(t)K_2(t). \quad (13)$$

Рівняння (12) отримано із (10) і виразу

$$\bar{p}^*(t) = [W_{21}(t, t_0) - W_{22}(t, t_0)W_{12}^{-1}(T_f, t_0)W_{11}(T_f, t_0)]\bar{x}^*(t_0) = K_2(t)\bar{x}^*(t_0), \quad (14)$$

який випливає із канонічної форми рівнянь і блочного подання фундаментальної матриці, тобто

$$W(t, t_0) = \begin{bmatrix} W_{11}(t, t_0) & W_{12}(t, t_0) \\ W_{21}(t, t_0) & W_{22}(t, t_0) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Так як  $R(t)$ ,  $B(t)$  задані, то для визначення  $G(t)$  необхідно знайти фундаментальну матрицю  $W(t, t_0)$ . Знаходження фундаментальної матриці здійснюється з використанням математичного апарату функцій Уолша. Це дозволяє отримувати наближене уявлення шуканої матриці у вигляді рядів Уолша, постійні коефіцієнти яких визначаються шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. В результаті застосування такого підходу матриця оптимальних законів керування (12) також визначена в термінах функцій Уолша. Елементи матриці є кусочно-постійними функціями, що значно спрощує їх реалізацію.

Алгоритм синтезу матриці посилення оптимального закону керування продемонструємо на прикладі розв'язування задачі стабілізації лінійної нестационарної системи першого порядку

$$\dot{x}(t) = tx(t) + u(t), x(0) = 1, t \in [0, 1]$$

з квадратичним функціоналом

$$I = 1/2 \int_0^1 [x^2(t') + u^2(t')] dt'.$$

Оптимальний закон управління в цьому випадку має вигляд

$$u^*(t) = -c(t)\bar{x}^*(t).$$

Для отримання необхідних апроксимацій в ряди Уолша вибрано чотири функції –  $R = 4$ . Отримані значення кусочно-постійного коефіцієнта посилення  $c(t)$

представлені на рис.3.(крива 1). Коефіцієнт підсилення  $c(t)$  для даної системи і функціоналу отримано також з рівняння Ріккати і має вигляд (крива 2)

$$\dot{c}(t) = c^2(t) - 2tc(t) - 1, \quad c(1) = 0.$$

Результат порівняння дозволяє встановити, що використання функцій Уолша для отримання коефіцієнта посилення оптимального закону керування дає задовільний результат навіть при  $R = 4$ .

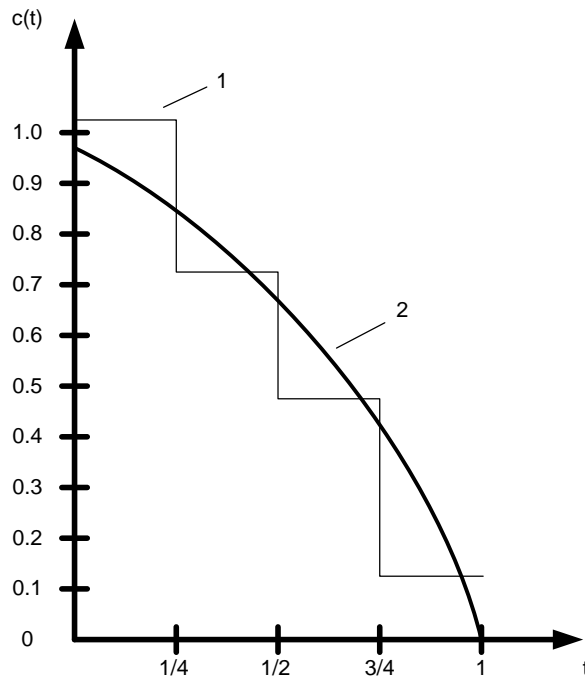


Рис.3.Значення кусочно-постійного коефіцієнта посилення  $c(t)$

Аналогічний підхід застосований і для синтезу оптимального в сенсі мінімізації енергії закону стабілізації програмного руху БПЛА. Задача в цьому випадку формулюється наступним чином. Знайти управління, яке дозволяє перевести систему (1) із заданого початкового стану до нуля протягом заданого часу і мінімізує функціонал

$$I = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{T_f} u^T(t) R(t) u(t) dt. \quad (16)$$

Оптимальний закон управління для даної задачі також може бути отримано на основі принципу мінімуму і визначено у вигляді (11). В силу  $R(t) > 0$  управління (11) надає єдиний мінімум гамільтоніану для (1) і відповідного функціоналу (16). Для встановлення зв'язку між допоміжним вектором  $\bar{p}^*(t)$  і вектором стану  $\bar{x}^*(t)$  використовується фундаментальна матриця системи спрощених канонічних рівнянь. Знаходження фундаментальної матриці здійснюється з використанням

математичного апарата функцій Уолша. Це дозволяє отримувати наближене уявлення шуканої матриці у вигляді рядів Уолша, постійні коефіцієнти яких визначаються шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Як і в першому випадку, в результаті застосування такого підходу матриця посилення  $G(t)$  оптимального закону керування (12) також визначена в термінах функцій Уолша, що значно спрощує їх практичну реалізацію.

У четвертому розділі вирішується задача модального синтезу оптимальних законів стабілізації програмного руху БПЛА, динаміка яких описується лінійними стаціонарними моделями, тобто рівняннями (1) з постійними коефіцієнтами. В нашому випадку суть модального синтезу оптимальних законів стабілізації полягає у визначенні числових значень коефіцієнтів зворотних зв'язків за всіма змінними стану БПЛА з метою забезпечення заданого розподілу коренів характеристичного рівняння (власних чисел) замкнутої оптимальної системи, тобто забезпечення якості перехідних процесів і мінімізації енергоресурсів. Процедура модального синтезу оптимального закону стабілізації здійснюється на основі запропонованого в роботі методу невизначених коефіцієнтів, який дозволяє визначник замкнутої оптимальної системи розгорнути у вигляді характеристичного полінома. Звідси, прирівнюючи отримані вирази із значеннями коефіцієнтів бажаного характеристичного полінома замкнутої оптимальної системи, отримуємо спільну систему алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів зворотного зв'язку. Труднощі вибору необхідних власних чисел визначника замкнутої оптимальної системи долаються запропонованою процедурою побудови і корекції спектру коренів замкнутої оптимальної системи стабілізації. Також отримано оптимальний закон стабілізації програмного руху стаціонарного БПЛА при наявності запізнювання в контурі управління. В цьому випадку динаміка руху БПЛА описується як

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + Bu, \quad (17)$$

де  $x$  – повністю вимірюваний вектор відхилень станів системи від програмної траєкторії руху ;  $A$ ,  $B$  – матриці коефіцієнтів розмірністю  $n \times n$ ,  $n \times 1$ ;  $u$  – скаляр, який характеризує відхилення органу управління, динамічна модель якого має вигляд

$$\dot{y} = \lambda_y y + d_u u(t - \theta), \quad (18)$$

де  $\lambda_y, d_u, \theta$  – константи, які визначаються особливостями управління БПЛА;  $u(t)$  – скалярний керуючий вплив.

Запізнювання в управлінні найчастіше визначається припущеннями, в силу яких вважають, що дія проміжних і підсилювальних ланок у БПЛА зводиться до

передачі сигналу із запізнюванням, величина якого мала. Синтезований з урахуванням запізнювання модальний оптимальний закон стабілізації забезпечує задані динамічні властивості процесу стабілізації руху БПЛА при виникненні відхилень від заданої (програмної) траєкторії. Однак, цей закон не усуває виникнення стійких автоколиваний в кінцевій точці процесу стабілізації поблизу заданої траєкторії руху. Для усунення цього ефекту пропонується використовувати метод компенсації запізнювання Бесса, згідно з яким необхідно, інтегруючи в зворотному часі систему (17), знайти поверхню, віддалену на час запізнювання від точок нульової неузгодженості, що лежать на програмній траєкторії руху системи (17). Фактично, ця поверхня являє собою трубу, усередині якої знаходиться програмна траєкторія.

Крім того, вирішена задача синтезу робастного закону стабілізації програмного руху БПЛА з гарантованою динамікою перехідних процесів, динаміка якого описується лінійною стаціонарною моделлю з параметричною невизначеністю виду

$$\dot{\bar{x}}(t) = (A + \Lambda)\bar{x}(t) + B\bar{u}(t), \quad (19)$$

де  $\bar{x}(t)$  –  $n$ -мірний вектор стану системи;  $\bar{u}(t)$  –  $m$ -мірний вектор управління;  $A, B$  – матриці коефіцієнтів лінійної моделі руху БПЛА відповідно розмірності  $(n \times n)$ ,  $(n \times m)$ ;  $\Lambda$  – невідома реальна матрична функція невизначеностей розмірності  $(n \times n)$ .

При цьому, необхідно визначити оптимальний закон стабілізації  $\bar{u}(t)$ , який переводить систему (1) із початкового стану  $\bar{x}(t_0) = x_0$  в кінцеве  $\bar{x}(T_f) = 0$  та мінімізує квадратичний функціонал вигляду (10). Запропонована в роботі модальна робастна стабілізація базується на відомому принципі гарантованої динаміки, в основу якого покладено концепцію допустимості, що використовує в якості оцінки первинні показники якості перехідних процесів, такі як час перехідного процесу, динамічна і статична точність. Зазначені динамічні показники перехідних процесів забезпечуються запропонованим в роботі вибором спектру коренів замкнутої оптимальної системи. Крім того, розроблені методи агрегації змінних стану і спрощення структури оптимальних регуляторів руху БПЛА, які значно полегшують дослідження, синтез та практичну реалізацію отриманих в роботі алгоритмів оцінки параметрів БПЛА і законів оптимальної стабілізації його руху.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача – розробка спеціалізованого математичного апарату і алгоритмічного забезпечення вирішення задач мінімізації енергетичних затрат БПЛА застосуванням оптимальної системи автоматичної стабілізації програмного руху БПЛА.

Основні результати і висновки полягають в наступному:

1. Проведений порівняльний аналіз відомих методів оптимізації показав, що їх використання для нестационарних систем, які в загальному випадку описують динаміку руху БПЛА, не дозволяє синтезувати оптимальні закони стабілізації в аналітичній формі. У зв'язку з цим у роботі запропоновано підхід, що використовує принцип мінімуму в поєднанні з математичним апаратом сплайн-функцій і функцій Уолша і структурно-функціональну схему процесу реалізації автоматичної оптимальної стабілізації програмного руху БПЛА.

2. Розроблено узагальнену процедуру оцінювання параметрів лінійних динамічних моделей руху БПЛА, яка використовує сплайн-функції та ортогональне розкладання в ряд за системою функцій Уолша, що дозволяє знаходити при мінімізації інтегрального квадратичного критерію нев'язки оцінки шуканих параметрів на основі рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь для широкого класу лінійних динамічних систем. При цьому розроблений адаптивний алгоритм розбиття інтервалу спостереження, що дозволяє істотно підвищити точність ідентифікації.

3. Вперше запропоновано оригінальний метод перетворення одного класу лінійних нестационарних моделей руху БПЛА в еквівалентні їм лінійні стаціонарні моделі, для яких можна застосувати добре відомі та апробовані методи оптимізації.

4. На основі запропонованого в роботі підходу, що використовує принцип мінімуму в поєднанні з математичним апаратом функцій Уолша для середньоквадратичних задач оптимізації енерговитрат БПЛА вперше синтезовано матриці посилення оптимального за мінімумом енергії і узагальненого квадратичного функціоналу законів управління з монотонними і знакопостійними параметрами у вигляді апроксимацій рядами Уолша, постійні коефіцієнти яких знаходяться шляхом розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

5. Запропоновано модальний синтез лінійних замкнутих стаціонарних систем з оптимальним законом управління у вигляді лінійної комбінації змінних стану, що дозволяє забезпечити задані динамічні властивості. Процедура модального синтезу оптимального закону управління здійснюється на основі запропонованого методу невизначених коефіцієнтів. Труднощі вибору необхідних власних чисел долаються запропонованою процедурою побудови і корекції спектру коренів замкнутої оптимальної системи управління.

6. Запропоновано модальний синтез оптимальних законів стабілізації об'єктів управління з транспортним запізнюванням у вигляді лінійної комбінації змінних стану, що дозволяють забезпечити задані динамічні властивості замкнутої оптимальної системи. Для усунення виникнення з-за наявності запізнювання стійких автоколивань в кінцевій точці процесу стабілізації поблизу програмної траєкторії руху пропонується використовувати метод компенсації запізнювання Бесса.



7. Запропонована процедура робастного модального синтезу, що базується на принципі гарантованою динаміки, що дозволяє вирішити проблему не тільки стабілізації програмного руху, але і необхідну її якість, і полягає в тому, що при можливих допустимих варіаціях параметрів руху БПЛА, перехідні процеси в системі стабілізації повинні залишатися в межах заданих допустимих областей (множин) гарантованим чином.

8. Розроблені методи агрегації змінних стану і спрощення структури оптимальних регуляторів руху БПЛА, які значно полегшують дослідження, синтез та практичну реалізацію отриманих в роботі алгоритмів оцінки параметрів руху БПЛА і законів оптимальної стабілізації його руху.

9. Розроблені оптимальні алгоритми стабілізації програмного руху БПЛА впроваджені в Науково-виробничому об'єднанні «АВІА» (м. Кременчук). Крім того, частина методів увійшла в програму навчання студентів на кафедрі технічної кібернетики факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Результати підтверджені актами впровадження, наведеними в додатку.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. А.А.Стенин, В.М.Бурлаков, В.В.Курбанов, М.А.Солдатова Синтез оптимального регулятора состояния в нестационарных системах на базе Функций Уолша. Bulgarian Journal for Engineering Design, issue. Mechanical Engineering Faculty, Technical University-Sofia №25.2015.-С.67-72. **Index Copernicus** (іноземне видання). *Здобувачем розроблена процедура синтезу оптимального за витратами енергії регулятора стабілізації;*
2. А.А.Стенин, О.И.Лисовиченко, В.П.Пасько, М.А.Солдатова Оптимизация энергозатрат в динамических системах с последствием. Bulgarian Journal for Engineering Design, issue. Mechanical Engineering Faculty, Technical University-Sofia..№27 .2015.-С.83-87 **Index Copernicus** (іноземне видання). *Здобувачем розроблена процедура синтезу оптимального за витратами палива управління в лінійних динамічних системах;*
3. А.А.Стенин,О.И.Лисовиченко,Д.А.Гуменный,М.А.Солдатова Параметрическая идентификация линейных распределенных динамических систем (секвентный подход) Bulgarian Journal for Engineering Design, issue. Mechanical Engineering Faculty, Technical University-Sofia.№ 31, 2017.pp.72-77 **Index Copernicus** (іноземне видання) *Здобувачем розроблений алгоритм параметричної ідентифікації розподілених систем;*

4. Михалев А.И., Солдатова М.А., Стенин А.С. Модальный синтез оптимальных законов стабилизации объектов управления с транспортным запаздыванием // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (111). - Дніпро, 2017. С-30 -38. **Index Copernicus** *Здобувачем розроблена процедура компенсації запізнювання;*
5. А.И.Михалёв, А.А.Стенин, В.П.Пасько, М.А.Солдатова Идентификация квазистационарных систем на базе сплайн-функций и функций Уолша. Системные технологии - Днепр-ск: НМетАУ, ИБК «Системні технології», №5(100),2015.С-53-60 **Index Copernicus** *Здобувачем розроблений алгоритм параметричної ідентифікації квазістаціонарних систем*
6. A.I.Mikhalyov, A.A.Stenin, V.N.Ignatenko, M.A.Soldatova, A.S.Stenin Synthesis of optimal consumption fuels one class of linear nonstationary systems (the method of predicted control) // System technologies. Regional interuniversity collection.- №6 (119) Dnipro.-2018.pp.64-72. **Index Copernicus** *Здобувачем розроблений алгоритм розімкненого оптимального закону управління;*
7. О.І.Михальов, О.А.Стенін, М.О.Солдатова, О.С.Стенін Модальна робастна стабілізація об'єктів керування з параметричною невизначеністю// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник.- Вип.-№2(115). Дніпро.- 2018.-С.61-67. **Index Copernicus** *Здобувачем розроблений робастний регулятор стабілізації;*
8. А.А.Стенин, Е.Ю.Мелкумян Писаренко Ю.В. Солдатова М.А. Адаптивная параметрическая сплайн-идентификация линейных нестационарных систем// Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», - 2014. - Вип. 1(24).-С.113-121 **WorldCat, Google scholar , РІНЦ.** *Здобувачем розроблені узагальнена методика параметричної ідентифікації з адаптивним алгоритмом розбиття інтервалу спостереження*
9. Е.Ю.Мелкумян, М.А.Солдатова Метод эквивалентного преобразования одного класса линейных нестационарных систем\\ Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», - 2015. - Вип. 1(26).-С.102-105 **WorldCat, Google scholar , РІНЦ** *Здобувачем розроблений метод еквівалентного перетворення;*
10. А.А.Стенин, М.М.Ткач, В.П.Пасько, М.А.Солдатова Методы агрегирования переменных в математических моделях динамических систем. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління».

- Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», - 2016. - Вип. 1(28).-С.129-137 **WorldCat, Google scholar , РІНЦ. Здобувачем розроблений метод агрегування змінних;**
11. А.А. Стенин, В.П. Пасько, Е.Ю. Мелкумян, М.А. Солдатова Анализ проблемы синтеза систем управления нелинейными динамическими объектами. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», - 2015. Вип. 2(27).-С.101-110. **WorldCat, Google scholar , РІНЦ. Здобувачем запропонований метод вирішення задачі АКОР для одного класу нелінійних систем;**
12. А.И.Михалев, М.А.Солдатова, А.С.Стенин Модальный синтез оптимальных законов стабилизации технологических процессов с запаздыванием в контуре управления (матеріали міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»- С.17-18), 28-30 березня 2017 р. м.Дніпро
13. Алексеев О.П., Солдатова М. О., Створення програмного забезпечення стабілізації руху безпілотних транспортних засобів (БТЗ) (матеріали науково-методичної конференції «Особливості викладання фахових дисциплін технічних спеціальностей – виклики часу та перспективи» -С.116), 21 березня 2017 р., м. Харків
14. В.М.Томашевський, В.П.Пасько, М.О.Солдатова Обобщенная методика идентификации параметров линейных динамических моделей технических систем(матеріали міжнародній науково-технічній конференції “Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС '2017”-С.150-154), 26-29 червня 2017 г., м. Чернігів
15. М.М.Ткач, В.П.Пасько, М.О.Солдатова Синтез робастного регулятора линейных динамических систем с неопределенностью параметров (матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології ІУСТ – Одеса – 2017»-с.100-103), 20-22 вересня 2017 р., м. Одеса

## АНОТАЦІЯ

Солдатова М. О. Автоматизація процесу стабілізації програмного руху безпілотного літального апарату (БПЛА), на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2019.

Метою роботи є розробка спеціалізованого математичного апарату та алгоритмічного забезпечення вирішення задачі мінімізації енергетичних витрат

БПЛА за рахунок оптимальної системи автоматичної стабілізації програмного руху БПЛА. Для розв'язання даної задачі розроблено процедуру оцінювання параметрів лінійних динамічних моделей БПЛА, яка використовує сплайн-функції та функції Уолша. Запропоновано оригінальний метод перетворення одного класу лінійних нестационарних моделей БПЛА в еквівалентні їм лінійні стаціонарні моделі, для яких можна застосувати добре відомі та апробовані методи оптимізації. На основі запропонованої в роботі процедури синтезу, що використовує принцип мінімуму в поєднанні з математичним апаратом функцій Уолша, вирішена задача синтезу розімкнутих оптимальних по витраті палива законів стабілізації програмного руху одного класу нестационарних БПЛА, а також для нестационарних БПЛА з монотонними і знакопостійними параметрами у випадку узагальненого квадратичного критерію синтезовано оптимальні закони стабілізації в аналітичній формі, зручній для їх практичної реалізації. Вперше запропоновано метод невизначених коефіцієнтів для реалізації процедури модального синтезу лінійних динамічних систем, також процедуру оптимізації процесів стабілізації лінійних динамічних систем з параметричною невизначеністю на основі модального синтезу і принципу гарантованої динаміки, що дає можливість синтезу робастного стабілізатора програмного руху БПЛА.

Ключові слова: БПЛА, програмна траєкторія, параметрична ідентифікація, лінійні нестационарні системи, сплайн-функції та функції Уолша, оптимальна стабілізація, принцип мінімуму, фазовий простір, модальний синтез, робастний регулятор

## АННОТАЦИЯ

Солдато́ва М.А.. Автоматизация процесса стабилизации программного движения беспилотного летательного аппарата (БПЛА), на правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. - Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, 2019.

Целью работы является разработка специализированного математического аппарата и алгоритмического обеспечения решения задачи минимизации энергетических затрат БПЛА за счет оптимальной системы автоматической стабилизации программного движения БПЛА. Для решения данной задачи разработана процедура оценивания параметров линейных динамических моделей БПЛА, которая использует сплайн-функции и функции Уолша. Предложен оригинальный метод преобразования одного класса линейных нестационарных моделей БПЛА в эквивалентные им линейные стационарные модели, для которых можно применить хорошо известные и апробированные методы оптимизации. На основе предложенной в работе процедуры синтеза, использующей принцип

минимума в сочетании с математическим аппаратом функций Уолша, решена задача синтеза разомкнутых оптимальных по расходу топлива законов стабилизации программного движения одного класса нестационарных БПЛА, а также для нестационарных БПЛА с монотонными и знакопостоянными параметрами в случае обобщенного квадратичного критерия синтезированы оптимальные законы стабилизации в аналитической форме, удобной для их практической реализации. Впервые предложен метод неопределенных коэффициентов для реализации процедуры модального синтеза оптимальных законов стабилизации программного движения стационарных БПЛА с заданными показателями качества переходных процессов, в том числе и при наличии запаздывания в контуре управления. Кроме того, предложена процедура оптимизации процессов стабилизации линейных динамических систем с параметрической неопределенностью на основе модального синтеза и принципа гарантируемой динамики, что дает возможность синтеза робастного стабилизатора программного движения БПЛА.

**Ключевые слова:** БПЛА, программная траектория, параметрическая идентификация, линейные нестационарные системы, сплайн-функции и функции Уолша, оптимальная стабилизация, принцип минимума, фазовое пространство, модальный синтез, робастный регулятор

## ANNOTATION

*Soldatova M.O.* Automation of the process of stabilization of the software movement of an unmanned aerial vehicle (UAV). - Qualifying scientific work based on the rights of the manuscript. The thesis for a candidate of technical science degree in speciality 13.05.07 "Automation of control processes" (015 - Automation and instrument making). - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky ", Kyiv, 2019.

The theoretical and practical significance of the tasks of analysis and synthesis of optimal systems of stabilization of the software movement of the UAV, with the relative complexity of its mathematical and computer apparatus, clearly determine the need for widespread use of modern means of computer technology and modern computer technologies for the implementation of appropriate methods and computational algorithms. However, known approaches and specific universal methods for the optimal synthesis of automatic control laws are not aimed at their wide use for solving specific problems arising in the practice of developing research on control systems of UAVs. In this regard, it is urgent to carry out research aimed at the development of mathematical methods for optimizing the transitional processes of stabilizing the UAV software movement in different flight conditions.

The purpose of the work is to develop a specialized mathematical apparatus and algorithmic support for solving the problems of minimizing energy costs of UAV at the expense of an optimal system of automatic stabilization of the software movement of the UAV. The use of optimal stabilization systems for UAV software movement is justified.

Linearized models for which a generalized procedure for estimating the parameters of UAV motion models based on spline functions and Walsh functions is developed, which is practically implemented for a number of UAV propulsion models. To select the step of the identification process an adaptive algorithm is proposed, which allows a significant increase in the accuracy of the estimates obtained.

The synthesis of the optimal laws of stabilizing the software motion of non-stationary UAVs in an analytical form has some difficulties. This is due to the need to solve the nonlinear Riccati differential equation, as well as the practical implementation of the obtained control law. For the first time, a method for converting a class of linear non-stationary models of UAV motion into equivalent stationary models is proposed. If this is not possible, the procedure of the synthesis of optimal laws of stabilization of the UAV software motion is proposed. This procedure uses the state transition matrix gives possibility to get an analytical form in the form of Walsh series. For normal optimization problems of linear non-stationary UAV models, whose structure is a consistent connection of typical dynamic units with monotonic and sign-constant parameters, the upper limit of the number of switches is defined, which makes it possible to synthesize the open algorithms of optimal control, which is demonstrated in the example of the 2-order system. For stationary UAVs in order to provide the necessary dynamic parameters of the stabilization process, for the first time modal synthesis using a new method of indefinite coefficients is proposed. In the presence of delay in the control system of the UAV, use the method of compensating for the delay of Bess. The choice of the desired spectrum of the roots of a closed optimal system is proposed procedure of their arrangement and correction in the work.

For stationary UAVs with parametric uncertainty, the procedure of modal synthesis of optimal laws of program motion stabilization using the principle of guaranteed dynamics is first proposed. that allows to solve the problem of not only the stabilization of the software movement, but also its required quality, and consists in the fact that with the possible allowable variations of the UAV parameters, the transients in the stabilization system must remain within the specified admissible regions (sets) in a guaranteed manner. For the analysis and synthesis of the optimal laws of stabilization of UAV program motion, methods of aggregation of state variables and simplification of the structure of optimal regulators proposed, which greatly facilitate the study, synthesis and practical implementation of algorithms for estimating UAV parameters and the laws of optimal stabilization of its motion.

**Keywords:** UAV, software trajectory, parametric identification, linear non-stationary systems, spline functions and Walsh functions, optimal stabilization, minimum principle, phase space, modal synthesis, robust control

